

Pelatihan Teknik Dasar Biologi Molekuler Berbasis Praktik untuk Penguatan Pemahaman Siswa Madrasah Aliyah Shirotul Fuqoha Malang, Indonesia

Ruri Siti Resmisari*, Didik Wahyudi, Evika Sandi Savitri, Suyono, Azizatur
Rahmah, Shinta

Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, Indonesia

ruri@bio.uin-malang.ac.id*

Abstrak

Keterbatasan perangkat laboratorium di Madrasah Aliyah Shirotul Fuqoha Gondanglegi, Kabupaten Malang, membatasi kesempatan siswa mempelajari biologi molekuler melalui praktik. Kegiatan pengabdian ini bertujuan memperkenalkan alur isolasi DNA, amplifikasi dengan *polymerase chain reaction* (PCR), analisis *random amplified polymorphic DNA* (RAPD), dan elektroforesis, serta mendeskripsikan perubahan skor pemahaman peserta setelah pelatihan. Program menggunakan pendekatan pelatihan berbasis praktik langsung dengan evaluasi *preeksperimental* satu kelompok sebelum–sesudah. Kegiatan mencakup survei kebutuhan pada 5 Juni 2026, sosialisasi pada 10 Juni 2026, serta pelatihan dan evaluasi pada 17 Juni 2026. Sasaran program adalah siswa kelas XI–XII IPA, dengan pelaksanaan pelatihan pada siswa kelas olimpiade dan pelibatan guru biologi. Rata-rata skor *pretest* dan *posttest* dianalisis secara deskriptif. Skor meningkat dari 73 menjadi 97, dengan selisih 24 poin dan kenaikan relatif 32,9%. Pengamatan selama kegiatan menunjukkan partisipasi aktif siswa dan respons positif sekolah. Kontribusi program terletak pada penyesuaian pelatihan dengan kebutuhan madrasah serta pengaitan pengenalan teknik molekuler dengan pelibatan guru dan rencana tindak lanjut. Hasil menunjukkan kenaikan skor pemahaman segera setelah pelatihan, tetapi belum membuktikan pengaruh kausal maupun penguasaan keterampilan laboratorium secara mandiri karena tidak tersedia kelompok pembandingan dan penilaian kinerja terstandar. Tindak lanjut diarahkan pada pelatihan lanjutan, penyusunan modul praktikum, dan perbaikan dokumentasi evaluasi.

Kata kunci: Biologi Molekuler, Madrasah Aliyah, Pelatihan Berbasis Praktik, PCR, RAPD

PENDAHULUAN

Pembelajaran biologi molekuler menuntut siswa menghubungkan konsep genetika dengan proses memperoleh dan menafsirkan bukti laboratorium. Praktikum dapat menyediakan pengalaman tersebut, tetapi keberadaan aktivitas laboratorium saja tidak menjamin terbentuknya pemahaman konseptual. Hubungan antara tujuan belajar, tindakan selama percobaan, dan penjelasan hasil perlu dirancang secara jelas (Hofstein & Lunetta, 2004; Abrahams & Millar, 2008). Sintesis penelitian pembelajaran sains menunjukkan pentingnya keterlibatan siswa dalam berpikir aktif dan menarik kesimpulan berdasarkan data, dengan bimbingan yang memadai selama kegiatan (Minner dkk., 2010; Furtak dkk., 2012).

Isolasi DNA, PCR, dan elektroforesis menyediakan rangkaian kegiatan untuk memperkenalkan hubungan tersebut. Isolasi menghasilkan bahan awal untuk analisis, PCR memperbanyak bagian DNA melalui siklus denaturasi, penempelan primer, dan pemanjangan, sedangkan elektroforesis memisahkan

fragmen DNA yang selanjutnya dapat divisualisasikan dengan sistem pewarnaan dan pencitraan yang sesuai (Saiki dkk., 1988; Lorenz, 2012; Lee dkk., 2012). Dengan demikian, PCR merupakan tahap amplifikasi, bukan metode visualisasi pita DNA.

RAPD merupakan pendekatan penanda molekuler berbasis PCR yang menggunakan primer berurutan arbitrer untuk menghasilkan pola fragmen DNA (Williams dkk., 1990). Penggunaan primer arbitrer juga menjadi dasar pendekatan sidik jari genom yang tidak memerlukan informasi sekuens awal (Welsh & McClelland, 1990). Penerapan RAPD untuk analisis keragaman dapat diperkenalkan melalui contoh penelitian, termasuk pada *Pteris vittata* (Mathur dkk., 2021). Namun, kesederhanaan rancangan primer tidak berarti reaksi bebas dari kebutuhan optimasi. Reprodusibilitas pola RAPD dapat dipengaruhi kondisi reaksi dan perbedaan pelaksanaan antarlaboratorium (Penner dkk., 1993; Jones dkk., 1997).

Pelatihan bioteknologi untuk siswa sekolah telah dilaporkan sebelumnya. Mohamed dkk. (2005) memperkenalkan program penjangkauan bioteknologi untuk sekolah menengah di Malaysia, termasuk kegiatan laboratorium. Ben-Nun dan Yarden (2009) mempelajari pembelajaran genetika molekuler di laboratorium penjangkauan yang dipandu guru. Bigler dan Hanegan (2011) mengevaluasi perubahan pengetahuan siswa setelah intervensi bioteknologi berbasis praktik, sedangkan Sorensen dkk. (2026) melaporkan pengembangan dan evaluasi lokakarya PCR untuk sekolah melalui program universitas. Literatur tersebut menunjukkan bahwa pengenalan PCR dan praktik biologi molekuler kepada siswa bukan teknik atau bentuk kegiatan yang baru.

Nilai tambah program karena itu perlu dinilai dari kesesuaiannya dengan kebutuhan mitra dan cara menghubungkan kegiatan dengan pembelajaran di sekolah. Pelatihan berbasis praktik memerlukan bimbingan, terutama ketika siswa belum terbiasa dengan prosedur dan interpretasi hasil (Lazonder & Harmsen, 2016). Kerangka ICAP membedakan keterlibatan pasif, aktif, konstruktif, dan interaktif; melakukan tindakan fisik tidak dengan sendirinya menunjukkan bahwa siswa telah membangun penjelasan konseptual (Chi & Wylie, 2014). Pelibatan guru dan evaluasi yang sesuai juga penting dalam program penjangkauan sains untuk siswa sekolah (Boyce dkk., 2019).

Madrasah Aliyah Shirotul Fuqoha Gondanglegi, Kabupaten Malang, merupakan mitra program. Observasi awal dan diskusi dengan sekolah mengidentifikasi keterbatasan fasilitas untuk pembelajaran biologi molekuler, khususnya mikropipet, mesin PCR, dan perangkat elektroforesis. Pembelajaran yang dilaporkan sekolah lebih banyak menggunakan penjelasan konseptual, sementara praktikum belum mencakup PCR dan RAPD. Temuan kebutuhan ini menjadi dasar pemilihan materi pelatihan; temuan tersebut tidak digunakan sebagai ukuran kuantitatif tingkat literasi sains seluruh siswa.

Kontribusi kegiatan ini terletak pada penerapan pelatihan yang disesuaikan dengan kebutuhan madrasah melalui rangkaian pemetaan kebutuhan, sosialisasi bersama guru dan siswa, pelatihan teknik molekuler, serta evaluasi awal. Dibandingkan laporan penjangkauan yang telah dirujuk, naskah ini memberikan pengalaman penerapan pada mitra madrasah dengan keterbatasan sarana dan menunjukkan bagaimana pelatihan awal dihubungkan dengan rencana pendampingan guru serta modul praktikum. Kebaruan yang diajukan bersifat kontekstual pada penerapan dan kemitraan, bukan penemuan teknik laboratorium atau bukti keunggulan model pelatihan baru. Keberlanjutan program masih merupakan arah tindak lanjut yang memerlukan evaluasi berikutnya.

Kegiatan bertujuan memperkenalkan hubungan antara isolasi DNA, PCR-RAPD, dan elektroforesis melalui pengalaman praktik, serta mendeskripsikan perubahan skor pemahaman peserta sebelum dan segera sesudah pelatihan. Penguatan keterampilan laboratorium menjadi tujuan pembelajaran, sedangkan capaian yang dapat dinilai dari data evaluasi yang tersedia dibatasi pada perubahan skor tes dan pengamatan

partisipasi. Pelibatan guru diarahkan untuk mendukung pengembangan pembelajaran praktikum pada tahap berikutnya.

METODE

Kegiatan pengabdian menggunakan pendekatan pelatihan berbasis praktik langsung (*hands-on practice*), dengan evaluasi *preeksperimental* satu kelompok sebelum–sesudah (*one-group pretest–posttest*). Rangkaian evaluasi dinyatakan sebagai O1–X–O2, dengan O1 berupa *pretest*, X berupa pelatihan, dan O2 berupa *posttest* setelah pelatihan. Tidak terdapat kelompok pembandingan maupun pengacakan peserta. Desain ini digunakan untuk mendeskripsikan perubahan skor dalam rangkaian kegiatan, bukan untuk mengisolasi pengaruh pelatihan dari pengaruh pengujian berulang atau faktor lain (Marsden & Torgerson, 2012).

Program dilaksanakan pada Juni 2026 dengan mitra Madrasah Aliyah Shirotul Fuqoha, Dusun Krajan, Desa Sepanjang, Kecamatan Gondanglegi, Kabupaten Malang, Jawa Timur. Sasaran program adalah siswa kelas XI–XII IPA dan guru biologi. Siswa pada jenjang tersebut dipilih karena telah memperoleh dasar genetika dan biologi sel. Pelaksanaan sosialisasi dan pelatihan diarahkan pada siswa kelas olimpiade; guru biologi dilibatkan sebagai pendamping untuk mendukung integrasi materi ke dalam pembelajaran berikutnya.

Program terdiri atas tiga tahap. Survei pada 5 Juni 2026 dilakukan melalui koordinasi dengan kepala sekolah dan guru serta observasi fasilitas untuk memetakan kebutuhan mitra. Sosialisasi pada 10 Juni 2026 mencakup pengenalan program dan alur teknik molekuler, diskusi fasilitas, keselamatan kerja, serta penjadwalan. Pelatihan dan evaluasi pada 17 Juni 2026 mencakup penyampaian konsep DNA, isolasi DNA, elektroforesis, serta PCR-RAPD, yang disertai kegiatan praktik sebagaimana dilaporkan dalam pelaksanaan program. *Pretest* diberikan sebelum pelatihan dan *posttest* setelah rangkaian pelatihan selesai.

Evaluasi pemahaman menggunakan instrumen yang dalam pelaksanaan disebut kuesioner *pretest* dan *posttest*. Data kuantitatif yang tersedia untuk pelaporan berupa rata-rata skor kelompok. Analisis dilakukan secara deskriptif dengan menghitung selisih rata-rata *posttest* dan *pretest*, serta kenaikan relatif terhadap rata-rata *pretest*. Kenaikan relatif dihitung sebagai $[(\text{rata-rata posttest} - \text{rata-rata pretest}) / \text{rata-rata pretest}] \times 100\%$. Ukuran ini berbeda dari *normalized gain* dan tidak menunjukkan persentase peserta yang meningkat.

Analisis tidak mencakup uji beda berpasangan, ukuran efek, atau interval kepercayaan karena data skor individual dan ukuran sebaran belum tersedia untuk pengolahan. Pengamatan selama kegiatan digunakan untuk mendeskripsikan partisipasi siswa dan respons sekolah. *Pretest–posttest* diperlakukan sebagai evaluasi pemahaman, sedangkan keterampilan prosedural belum dinilai dengan rubrik kinerja terstandar. Dengan demikian, pengamatan keterlibatan tidak digunakan sebagai pengganti pengukuran kompetensi laboratorium.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Survei lapangan pada 5 Juni 2026 mencakup koordinasi tim dengan kepala sekolah dan dewan guru serta pengamatan kebutuhan mitra. Diskusi menghasilkan kesepakatan awal pelaksanaan program dan menjadi dasar penetapan materi sosialisasi serta pelatihan (Gambar 1). Kebutuhan utama yang diidentifikasi adalah kesempatan belajar teknik molekuler melalui kegiatan praktik dengan dukungan pendampingan.



Gambar 1. Survei lapangan dan koordinasi program di MA Shirotul Fuqoha pada 5 Juni 2026

Sosialisasi pada 10 Juni 2026 memperkenalkan tujuan program kepada siswa kelas olimpiade serta membahas penerapan biologi molekuler dalam pembelajaran. Alur yang dikenalkan meliputi isolasi DNA, amplifikasi menggunakan PCR termasuk pendekatan RAPD, serta pemisahan dan visualisasi fragmen melalui elektroforesis dan sistem pencitraan yang sesuai. Siswa mengikuti sesi tanya jawab mengenai penggunaan teknik tersebut. Tim dan guru juga membahas fasilitas yang tersedia, keselamatan kerja, dan jadwal pelatihan (Gambar 2). Respons peserta pada tahap ini diperlakukan sebagai pengamatan partisipasi, bukan skor motivasi yang diukur dengan instrumen terstandar.



Gambar 2. Sosialisasi program dan pengenalan alur teknik molekuler pada 10 Juni 2026

Pelatihan dan evaluasi dilaksanakan pada 17 Juni 2026. Materi teknik dasar biologi molekuler diberikan kepada siswa kelas olimpiade, dengan pretest sebelum kegiatan dan posttest setelah kegiatan. Pada tahap evaluasi, tim dan sekolah membahas pelaksanaan program serta rencana kerja sama berikutnya. Tindak lanjut yang disepakati dalam laporan kegiatan meliputi pelatihan lanjutan dan penyusunan modul panduan praktikum (Gambar 3). Kesepakatan ini merupakan rencana, sehingga belum diperlakukan sebagai bukti bahwa pelatihan lanjutan atau modul telah diselesaikan.



Gambar 3. Pelaksanaan pelatihan dan evaluasi program pada 17 Juni 2026

Rata-rata skor peserta meningkat dari 73 pada pretest menjadi 97 pada posttest. Selisih rata-rata tersebut sebesar 24 poin, dengan kenaikan relatif sebesar $(24/73) \times 100\% = 32,9\%$ (Tabel 1). Angka ini merupakan perubahan pada tingkat rata-rata kelompok. Tanpa data individual, hasil tersebut tidak menjelaskan sebaran skor, jumlah siswa yang meningkat, ataupun keseragaman perubahan antarpeserta.

Tabel 1. Ringkasan Skor Pretest Dan Posttest Peserta

Ukuran deskriptif	Nilai
Rata-rata pretest	73
Rata-rata posttest	97
Selisih rata-rata	24 poin
Kenaikan relatif terhadap pretest	32,9%

Catatan: angka disajikan secara deskriptif berdasarkan rekap yang dilaporkan. Simpangan baku, galat baku, interval kepercayaan, dan hasil uji statistik tidak ditampilkan karena data pendukungnya belum tersedia untuk analisis.

Pengamatan selama kegiatan mencatat partisipasi dalam tanya jawab dan keterlibatan siswa dalam aktivitas yang diperkenalkan tim. Sekolah merespons positif program dan menyampaikan kebutuhan akan pelatihan lanjutan. Temuan ini mendukung deskripsi penerimaan dan keterlaksanaan program. Tanpa rubrik observasi serta skor kinerja, temuan tersebut belum cukup untuk menyatakan peningkatan kompetensi psikomotor atau kemampuan melakukan prosedur secara mandiri.

Pembahasan

Kenaikan rata-rata skor sebesar 24 poin menunjukkan hasil evaluasi pemahaman segera setelah pelatihan yang lebih tinggi daripada sebelum pelatihan. Arah perubahan ini relevan dengan penelitian bioteknologi berbasis praktik pada siswa sekolah (Bigler & Hanegan, 2011). Namun, penelitian tersebut menggunakan perbandingan yang tidak identik dengan evaluasi kegiatan ini; besaran kenaikan tidak dapat dibandingkan langsung. Meta-analisis pembelajaran aktif pada pendidikan tinggi juga memberikan dasar pedagogis bagi pelibatan peserta, tetapi bukan bukti langsung efektivitas program pada siswa madrasah ini (Freeman dkk., 2014).

Secara pedagogis, rangkaian isolasi DNA, PCR-RAPD, dan elektroforesis berpotensi membantu siswa memahami hubungan antara bahan biologis, proses amplifikasi, dan pola fragmen. Potensi tersebut memerlukan pengaitan tindakan dengan alasan ilmiah, misalnya menjelaskan fungsi primer dan menafsirkan makna pita DNA. Praktikum yang hanya menekankan penyelesaian langkah kerja belum tentu menghasilkan pemahaman konseptual (Abrahams & Millar, 2008). Bimbingan selama pembelajaran dan kesempatan siswa

menjelaskan hasil menjadi arah perbaikan yang sesuai dengan literatur pembelajaran berbasis inkuiri (Lazonder & Harmsen, 2016).

Dari sisi teknis, PCR membutuhkan pengaturan komponen dan siklus termal yang sesuai, sedangkan elektroforesis membutuhkan perangkat, bahan, dan prosedur visualisasi yang tepat (Lorenz, 2012; Lee dkk., 2012). RAPD juga memerlukan pengendalian kondisi reaksi untuk memperoleh pola yang dapat direproduksi (Penner dkk., 1993; Jones dkk., 1997). Karena itu, kemudahan pengenalan prinsip RAPD tidak boleh disamakan dengan kemampuan sekolah menyelenggarakan seluruh analisis secara mandiri. Dokumentasi protokol, penyediaan akses alat, dan pendampingan menjadi kebutuhan penting untuk pengembangan pelatihan berikutnya.

Interpretasi hasil dibatasi oleh desain satu kelompok tanpa pembandingan, ketersediaan data yang hanya berupa rata-rata, serta pengukuran segera setelah kegiatan. Pengaruh pengujian berulang dan faktor lain belum dapat dipisahkan dari pengaruh pelatihan (Marsden & Torgerson, 2012). Deskripsi jumlah peserta yang mengikuti kedua tes, karakteristik butir, aturan penskoran, dan bukti mutu instrumen juga belum memadai untuk menilai ketepatan pengukuran. Pengembangan instrumen memerlukan kesesuaian antara konstruk dan butir serta pengujian yang terdokumentasi (Artino dkk., 2014). Jika konsistensi internal dihitung pada evaluasi berikutnya, interpretasinya perlu mempertimbangkan struktur instrumen; koefisien reliabilitas tidak dengan sendirinya membuktikan validitas (Tavakol & Dennick, 2011).

Tindak lanjut awal yang dilaporkan berupa pelatihan intensif dan penyusunan modul praktikum bersama sekolah. Agar rencana tersebut dapat dievaluasi, pengembangan berikutnya perlu mencatat peran guru, materi yang digunakan kembali, akses alat, dan pelaksanaan praktikum setelah pendampingan. Pelibatan guru relevan dengan pengalaman laboratorium penjangkauan yang dipandu guru (Ben-Nun & Yarden, 2009), sedangkan evaluasi pengembangan profesional perlu menghubungkan pembelajaran guru, perubahan praktik mengajar, dan hasil siswa (Desimone, 2009). Perjanjian kerja sama, penataan laboratorium, dan luaran kekayaan intelektual dapat dipertimbangkan sebagai pengembangan berikutnya sesuai kesiapan mitra; semuanya belum dilaporkan sebagai luaran yang telah tercapai.

Evaluasi lanjutan disarankan menggabungkan skor tes berpasangan dengan penilaian kinerja praktik menggunakan indikator yang jelas, serta pengukuran retensi pada waktu yang ditetapkan. Umpan balik selama pembelajaran dapat digunakan untuk membantu peserta memperbaiki pemahaman (Black & Wiliam, 1998). Pembagian kesempatan praktik dan diskusi yang terstruktur juga perlu diperhatikan agar keterlibatan tidak hanya terkonsentrasi pada siswa yang paling aktif (Tanner, 2013). Rekomendasi tersebut merupakan rancangan perbaikan, bukan prosedur yang dinyatakan telah diterapkan pada kegiatan ini.

KESIMPULAN

Pelatihan teknik dasar biologi molekuler di MA Shirotul Fuqoha dilaksanakan melalui survei, sosialisasi, serta pelatihan dan evaluasi pada Juni 2026. Kontribusinya berupa penerapan pelatihan sesuai kebutuhan mitra madrasah dan pengaitan kegiatan awal dengan pelibatan guru serta rencana pengembangan praktikum. Rata-rata skor meningkat dari 73 menjadi 97, dengan selisih 24 poin atau kenaikan relatif 32,9%. Hasil ini menunjukkan kenaikan skor pemahaman segera setelah pelatihan, disertai pengamatan partisipasi aktif peserta dan respons positif sekolah.

Desain satu kelompok dan keterbatasan dokumentasi evaluasi belum memungkinkan kesimpulan kausal mengenai efektivitas program atau penguasaan keterampilan laboratorium secara mandiri. Pelatihan lanjutan dan modul praktikum masih merupakan rencana tindak lanjut. Evaluasi berikutnya perlu melengkapi jumlah dan data peserta, dokumentasi instrumen serta protokol, penilaian kinerja, dan pengukuran retensi agar keberlanjutan serta capaian kompetensi dapat dinilai secara lebih kuat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Dekan Fakultas Sains dan Teknologi beserta jajaran, serta Ketua Program Studi Biologi atas dukungan yang diberikan bagi terlaksananya *Community Development Program* ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada kepala sekolah, dewan guru, dan siswa Madrasah Aliyah Shirotul Fuqoha Gondanglegi atas kesediaannya menjadi mitra kegiatan, serta kepada Rendha Maulana Haritzah, Novia Fitri Radita, dan Isma Salsabila Ramadanti yang telah membantu pelaksanaan kegiatan di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abrahams, I., & Millar, R. (2008). Does Practical Work Really Work? A study of the effectiveness of practical work as a teaching and learning method in school science. *International Journal of Science Education*, 30(14), 1945–1969. <https://doi.org/10.1080/09500690701749305>
- Artino, A. R., La Rochelle, J. S., Dezee, K. J., & Gehlbach, H. (2014). Developing questionnaires for educational research: AMEE Guide No. 87. *Medical Teacher*, 36(6), 463–474. <https://doi.org/10.3109/0142159x.2014.889814>
- Ben-Nun, M. S., & Yarden, A. (2009). Learning molecular genetics in teacher-led outreach laboratories. *Journal of Biological Education*, 44(1), 19–25. <https://doi.org/10.1080/00219266.2009.9656187>
- Bigler, A. M., & Hanegan, N. L. (2011). Student Content Knowledge Increases After Participation in a Hands-on Biotechnology Intervention. *Journal of Science Education and Technology*, 20(3), 246–257. <https://doi.org/10.1007/s10956-010-9250-7>
- Black, P., & Wiliam, D. (1998). Assessment and Classroom Learning. *Assessment in Education: Principles, Policy & Practice*, 5(1), 7–74. <https://doi.org/10.1080/0969595980050102>
- Boyce, A. S., Avent, C., Adetogun, A., Servance, L., DeStefano, L., Nerem, R., & Platt, M. O. (2019). Implementation and evaluation of a biotechnology research experience for African-American high school students. *Evaluation and Program Planning*, 72, 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2018.10.004>
- Chi, M. T. H., & Wylie, R. (2014). The ICAP Framework: Linking Cognitive Engagement to Active Learning Outcomes. *Educational Psychologist*, 49(4), 219–243. <https://doi.org/10.1080/00461520.2014.965823>
- Desimone, L. M. (2009). Improving Impact Studies of Teachers' Professional Development: Toward Better Conceptualizations and Measures. *Educational Researcher*, 38(3), 181–199. <https://doi.org/10.3102/0013189x08331140>
- Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(23), 8410–8415. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>
- Furtak, E. M., Seidel, T., Iverson, H., & Briggs, D. C. (2012). Experimental and Quasi-Experimental Studies of Inquiry-Based Science Teaching: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, 82(3), 300–329. <https://doi.org/10.3102/0034654312457206>
- Hofstein, A., & Lunetta, V. N. (2004). The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science Education*, 88(1), 28–54. <https://doi.org/10.1002/sce.10106>

- Jones, C. J., Edwards, K. J., Castaglione, S., Winfield, M. O., Sala, F., van de Wiel, C., Bredemeijer, G., Vosman, B., Matthes, M., Daly, A., Brettschneider, R., Bettini, P., Buiatti, M., Maestri, E., Malcevski, A., Marmioli, N., Aert, R., Volckaert, G., Rueda, J., ..., Karp, A. (1997). Reproducibility testing of RAPD, AFLP and SSR markers in plants by a network of European laboratories. *Molecular Breeding*, 3(5), 381–390. <https://doi.org/10.1023/a:1009612517139>
- Lazonder, A. W., & Harmsen, R. (2016). Meta-Analysis of Inquiry-Based Learning: Effects of Guidance. *Review of Educational Research*, 86(3), 681–718. <https://doi.org/10.3102/0034654315627366>
- Lee, P. Y., Costumbrado, J., Hsu, C. Y., & Kim, Y. H. (2012). Agarose Gel Electrophoresis for the Separation of DNA Fragments. *Journal of Visualized Experiments*, (62), 3923. <https://doi.org/10.3791/3923>
- Lorenz, T. C. (2012). Polymerase Chain Reaction: Basic Protocol Plus Troubleshooting and Optimization Strategies. *Journal of Visualized Experiments*, (63), 3998. <https://doi.org/10.3791/3998>
- Marsden, E., & Torgerson, C. J. (2012). Single group, pre- and post-test research designs: Some methodological concerns. *Oxford Review of Education*, 38(5), 583–616. <https://doi.org/10.1080/03054985.2012.731208>
- Mathur, J., Khare, P. B., Panwar, A., & Ranade, S. A. (2021). Analysis of Genetic Variability Amongst Polyploid Genotypes of *Pteris vittata* L. From Various Geographic Locales of India. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 613847. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.613847>
- Minner, D. D., Levy, A. J., & Century, J. (2010). Inquiry-based science instruction—what is it and does it matter? Results from a research synthesis years 1984 to 2002. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(4), 474–496. <https://doi.org/10.1002/tea.20347>
- Mohamed, R., Firdaus-Raih, M., Senafi, S., Murad, A. M., Sidik, N. M., Lian, W. K., Daud, F., Ariffin, S. H. Z., Zamrod, Z., Seng, T. C., Othman, A. S., Harmin, S. A., & Saad, M. Y. R. (2005). A nationwide biotechnology outreach and awareness program for Malaysian high schools. *Electronic Journal of Biotechnology*, 8(1). <https://doi.org/10.2225/vol8-issue1-fulltext-2>
- Penner, G. A., Bush, A., Wise, R., Kim, W., Domier, L., Kasha, K., Laroche, A., Scoles, G., Molnar, S. J., & Fedak, G. (1993). Reproducibility of random amplified polymorphic DNA (RAPD) analysis among laboratories. *PCR Methods and Applications*, 2(4), 341–345. <https://doi.org/10.1101/gr.2.4.341>
- Saiki, R. K., Gelfand, D. H., Stoffel, S., Scharf, S. J., Higuchi, R., Horn, G. T., Mullis, K. B., & Erlich, H. A. (1988). Primer-Directed Enzymatic Amplification of DNA with a Thermostable DNA Polymerase. *Science*, 239(4839), 487–491. <https://doi.org/10.1126/science.2448875>
- Sorensen, A., Coubrough, K., Dowdells, C., Carter, K. C., Tate, R. J., Pickard, B. S., Neves, K. B., & Murphy, F. (2026). Improving access to practical molecular biology: development and evaluation of a university-led PCR workshop for schools. *Journal of Biological Education*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/00219266.2026.2652871>
- Tanner, K. D. (2013). Structure Matters: Twenty-One Teaching Strategies to Promote Student Engagement and Cultivate Classroom Equity. *CBE—Life Sciences Education*, 12(3), 322–331. <https://doi.org/10.1187/cbe.13-06-0115>
- Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). Making sense of Cronbach's alpha. *International Journal of Medical Education*, 2, 53–55. <https://doi.org/10.5116/ijme.4dfb.8dfd>
- Welsh, J., & McClelland, M. (1990). Fingerprinting genomes using PCR with arbitrary primers. *Nucleic Acids Research*, 18(24), 7213–7218. <https://doi.org/10.1093/nar/18.24.7213>
- Williams, J. G. K., Kubelik, A. R., Livak, K. J., Rafalski, J. A., & Tingey, S. V. (1990). DNA polymorphisms amplified by arbitrary primers are useful as genetic markers. *Nucleic Acids Research*, 18(22), 6531–6535. <https://doi.org/10.1093/nar/18.22.6531>